УДК 629.391

**В.В. БАРАННИК, П.Н. ГУРЖИЙ**

***Харьковский университет Воздушных Сил, Украина***

# КОДИРОВАНИЕ МАССИВОВ ЦВЕТОВЫХ КООРДИНАТ В РАЗНОСТНОМ ПОЛИАДИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Излагается кодирование массивов цветовых координат в разностном полиадическом пространстве по рекуррентной схеме. Проводится оценка степени сжатия видеоданных.

**Разностное полиадическое пространство, цветовые координаты, структурная избыточность**

## Введение

В настоящее время процессы управления в экономике и в промышленности, а также процессы проведения фундаментальных исследований в науке и технике связаны с обработкой, хранением и передачей больших объемов видеоданных. При этом предъявляются требования, связанные с обеспечением достоверности информации и ее обработкой в реальном времени. В тоже время существующие технические возможности вычислительных средств и каналов передачи данных являются ограниченными. Это позволяет передавать в реальном времени лишь 10% от необходимого объема.

Один из вариантов увеличения объемов передаваемых видеоданных состоит в их компактном представлении. Однако, методы сжатия без потери качества обеспечивают незначительные степени сжатия относительно методов с потерей качества [1 – 2]. Поэтому актуальным направлением является разработка методов, позволяющих дополнительно повысить степень сжатия без потери качества.

## 1. Формулирование проблемы

Наиболее высокую скорость сжатия и восстановления без потери качества имеют методы, основанные на выявлении длин серий. Кроме того, среди известных методов данные методы позволяют:

– в большей степени исключить структурную избыточность, вызванную повторяемостью элементов;

– достичь наибольшей степени сжатия при обработке искусственных изображений.

Одним из методов, обеспечивающих наибольшую степень сжатия изображений с выделением длин серий, является метод полиадического кодирования длин серий и цветовых координат [3, 4]. Кроме того, достоинством данного метода является снижение ограничений на выбор максимальной длины серии. Однако, ему присущи недостатки, состоящие в том, что:

– для сильнонасыщенных изображений резко увеличивается количество серий. Это приводит к росту количества разрядов на представление цветовых координат;

– отбор элементов для полиадического кодирования осуществляется на основе постолбцовой схемы. Такая обработка приводит к повышению времени на сжатие изображений.

В связи с этим необходимо разработать метод сжатия видеоданных в реальном времени без потери их качества на основе дополнительного устранения избыточности в массивах цветовых координат для различных классов изображений.

## 2. Выбор направлений повышения степени сжатия

Для определения направлений дополнительного увеличения коэффициента сжатия изображений рассмотрим выражения для комбинированного полиадического кодирования массивов цветовых координат [3, 4]:

$$N_{\overset{\bullet}{n}_{цв}} = \sum_{i=1}^{m_{цв}} \sum_{j=1}^{\overset{\bullet}{n}_{цв}} c_{ij}\, h_{ij}\,; \qquad (1)$$

$$h_{ij} = \prod_{\gamma=i+1}^{m_{цв}} \psi_{\gamma j} \prod_{u=j+1}^{\overset{\bullet}{n}_{цв}} \prod_{\gamma=1}^{m_{цв}} \psi_{\gamma u}\,, \qquad (2)$$

где $N_{\overset{\bullet}{n}_{цв}}$ – значение кода-номера, вычисленного для $\overset{\bullet}{n}_{цв}$ столбцов по $m_{цв}$ элементов в каждом; $\psi_{\gamma j}$ – основание двумерного полиадического числа, определяемое как минимальное значение из двух максимумов γ-й строки и j-го столбца массива цветовых координат $\psi_{\gamma j} = \min(\lambda_\gamma, \chi_j)$; $h_{ij}$ – накопленное произведение оснований $\psi_{\gamma j}$ полиадического числа, составленного из цветовых координат $c_{ij}$.

Из анализа выражений (1), (2) следует, что на значение коэффициента сжатия влияют размеры обрабатываемых массивов и динамический диапазон их элементов. Поэтому резкое снижение степени сжатия при обработке сильнонасыщенных реалистических изображений объясняется увеличением количества цветовых координат и повышением их динамического диапазона. Это происходит в результате снижения средней длины серии одинаковых элементов.

Поэтому для дополнительного уменьшения объема кодового представления сжатого изображения предлагается:

1. Осуществлять кодирование массивов цветовых координат в разностном полиадическом пространстве.

2. Проводить адаптивное (гибкое) изменение начального уровня отсчета допустимых кодов-номеров в разностном полиадическом пространстве в зависимости от динамического диапазона цветовых координат.

## 3. Обоснование возможности дополнительного устранения комбинаторной избыточности

Суть разностного (дифференциального) полиадического представления заключается в том, что массивы цветовых координат рассматриваются не как двумерные абсолютные полиадические числа, а как двумерные разностные полиадические числа. В качестве элементов разностного полиадического числа выступают длины расстояний от него до двумерного полиадического числа, имеющего минимальные значения элементов (нижний уровень полиадических чисел). В этом случае конкретный массив цветовых координат представляется кодом длины расстояния от данного массива до полиадического числа с минимальными значениями элементов (нижним уровнем отсчета полиадических чисел в разностном полиадическом пространстве). Под длиной расстояния $R(\min)^{(v)}$ от текущего массива до нижнего уровня в разностном полиадическом пространстве понимается количество полиадических чисел, удовлетворяющих данному пространству.

Описание разностного полиадического пространства основывается на векторе $S$ ограничений на динамический диапазон значений длин расстояний:

$$S = \{ s_{1j}, s_{2j}, \ldots, s_{mj} \}; \quad s_{ij} = \psi_{ij} - \mu_i\,; \qquad (3)$$

$$\mu_i = \min_{1 \le j \le n} \{ c_{ij} \}\,,\ i = \overline{1, m_{цв}}\,,\ \mu_i \le c_{ij} < \psi_{ij}\,, \qquad (4)$$

где $s_{ij}$ – разность между максимальным $\psi_{ij}$ и минимальным $\mu_i$ значениями в $i$-й строке массива цветовых координат.

С учетом ограничений (3) и (4) значение кода длины расстояния $R(\min)^{(v)}$ между массивом цветовых координат $C = \{c_{ij}\}$, $i = \overline{1, m_{цв}}$; $j = \overline{1, n_{цв}}$ и нижним уровнем полиадических чисел $\{\mu_i\}$ будет равно

$$R(\min)^{(\nu)} = \sum_{i=1}^{\nu} \Delta c_{ij}^{(\min)} \prod_{\xi=i+1}^{\nu} s_{\xi j}\,, \qquad (5)$$

где $\nu$ – количество элементов в массиве цветовых координат; $\Delta c_{ij}^{(\min)}$ – разность между значением цветовой координаты и соответствующим значением элемента нижнего уровня полиадических чисел

$$\Delta c_{ij}^{(\min)} = c_{ij} - \mu_i\,. \qquad (6)$$

В данном случае последовательность длин расстояний $\Delta c_{ij}^{(\min)}$ представляет собой число, записанное в смешенное системе оснований. При этом основания находятся по выражению (3). Поэтому для отображения данного числа на натуральную ось используется выражение (5).

Для обоснования того, что за счет перехода от абсолютного к разностному полиадическому кодированию достигается дополнительное сокращение комбинаторной избыточности необходимо показать, что значение кода длины расстояния $R(\min)^{(\nu)}$ для текущего массива цветовых координат в разностном полиадическом пространстве меньше, чем значение кода-номера $N^{(\nu)}$ в абсолютном полиадическом пространстве, т.е.

$$R(\min)^{(\nu)} < N^{(\nu)}\,, \qquad (7)$$

где величина $N^{(\nu)}$ с учетом формул (1) и (2) равна

$$N^{(\nu)} = \sum_{i=1}^{\nu} c_{ij} \prod_{\xi=i+1}^{\nu} \psi_{\xi j}\,. \qquad (8)$$

Доказательство неравенства (7) основывается на сравнении выражений (5) и (8). Для этого распишем выражение (5) с учетом соотношений (3) и (6):

$$R(\min)^{(\nu)} = \sum_{i=1}^{\nu} (c_{ij} - \mu_i) \prod_{\xi=i+1}^{\nu} (\psi_{ij} - \mu_i)\,. \qquad (9)$$

Тогда сравнив составные части выражений (8) и (9):

$$(c_{ij} - \mu_i) < c_{ij}\,; \qquad \prod_{\xi=i+1}^{\nu} (\psi_{ij} - \mu_i) < \prod_{\xi=i+1}^{\nu} \psi_{ij}$$

приходим к выводу о том, что неравенство (7) выполняется.

Докажем, более строгое неравенство, состоящее в том, что длина расстояния между массивом цветовых координат и нижним уровнем полиадических чисел в $N^{(\nu)} - N(\min)^{(\nu)}$ абсолютном полиадическом пространстве больше, чем длина расстояния $R(\min)^{(\nu)}$ между ними в разностном полиадическом пространстве, т.е.

$$R(\min)^{(\nu)} \le N^{(\nu)} - N(\min)^{(\nu)}\,, \qquad (10)$$

где $N(\min)^{(\nu)}$ – значение кода-номера нижнего уровня полиадических чисел в абсолютном полиадическом пространстве

$$N(\min)^{(\nu)} = \sum_{i=1}^{\nu} \mu_i \prod_{\xi=i+1}^{\nu} \psi_{\xi j}\,. \qquad (11)$$

Для доказательства неравенства (10) распишем его левую часть

$$\begin{aligned} N^{(\nu)} - N(\min)^{(\nu)} &= \sum_{i=1}^{\nu} c_{ij} \prod_{\xi=i+1}^{\nu} \psi_{\xi j} - \sum_{i=1}^{\nu} \mu_i \prod_{\xi=i+1}^{\nu} \psi_{\xi j} = \\ &= \sum_{i=1}^{\nu} (c_{ij} - \mu_i) \prod_{\xi=i+1}^{\nu} \psi_{\xi j}\,. \end{aligned} \qquad (12)$$

Сравнив весовые коэффициенты в выражениях (9) и (12), приходим к выводу о том, что неравенство (10) выполняется.

Таким образом, из выполнения неравенств (7) и (10) вытекает, что в результате перехода от представления массивов цветовых координат в абсолютном полиадическом пространстве к их представлению в разностном пространстве обеспечивается дополнительное исключение комбинаторной избыточности, вызванной:

– уменьшением количества разрешенных комбинаций за счет увеличения нижнего уровня полиадических чисел;

– дополнительным сокращением длины расстояния между нижним уровнем полиадических чисел и массивом цветовых координат за счет запрета комбинаций, не удовлетворяющих системам ограничений (3) и (4).

С учетом формул (3) и (4) количество допустимых массивов цветовых координат в разностном полиадическом пространстве (количество разностных полиадических чисел) равно

$$\left| R \right| = \prod_{j=1}^{n_{цв}} \prod_{i=1}^{m_{цв}} s_{ij} \ . \qquad (13)$$

Отсюда минимальное увеличение степени сжатия $k_m$ за счет перехода от абсолютного к разностному полиадическому кодированию находится по следующей формуле:

$$k_m = \frac{\ell og_2 \left( \prod_{j=1}^{n_{цв}} \prod_{i=1}^{m_{цв}} \psi_{ij} \ - 1 \right)}{\ell og_2 \left( \prod_{j=1}^{n_{цв}} \prod_{i=1}^{m_{цв}} \left( \psi_{ij} - \mu_i \right) - 1 \right)} , \qquad (14)$$

где $\ell og_2 \left( \prod_{j=1}^{n_{цв}} \prod_{i=1}^{m_{цв}} \left( \psi_{ij} - \mu_i \right) - 1 \right)$ – количество разрядов, затрачиваемое на представление массива цветовых координат, который является наиболее удаленным от нижнего уровня полиадических чисел; $\ell og_2 \left( \prod_{j=1}^{n_{цв}} \prod_{i=1}^{m_{цв}} \psi_{ij} \ - 1 \right)$ – максимальное количество разрядов, отводимое на представление массива цветовых координат в случае его представления в виде обычного полиадического числа.

Дополнительное повышение степени сжатия достигается на основе адаптивного выбора начального уровня отсчета длины расстояния до текущего массива цветовых координат.

Анализ приведенного выше выражения (14) показывает, что значения цветовых координат $c_{ij}$ могут находиться на разном расстоянии от соответствующих значений нижнего и верхнего уровней полиадических чисел, т.е.

$$c_{ij} - \mu_i \ \neq \psi_{ij} - c_{ij} \ - 1 \, . \qquad (15)$$

Обозначим левую и правую части неравенства (15) соответственно через $\Delta c_{ij}^{(\min)}$, $\Delta c_{ij}^{(\max)}$, равные:

$$\Delta c_{ij}^{(\min)} = c_{ij} - \mu_i \, ; \ \Delta c_{ij}^{(\max)} = \psi_{ij} - 1 - c_{ij} \, . \qquad (16)$$

Обозначим длину расстояния между массивом цветовых координат и минимальным, максимальным уровнями полиадических чисел в разностном полиадическом пространстве соответственно через $R(\min)^{(\nu)}$ и $R(\max)^{(\nu)}$:

$$R(\max)^{(\nu)} = \sum_{i=1}^{\nu} \Delta c_{ij}^{(\max)} \prod_{\xi=i+1}^{\nu} s_{\xi j} \ . \qquad (17)$$

При этом с учетом соотношения (15) выполняется неравенство $R(\min)^{(\nu)} \ \neq \ R(\max)^{(\nu)}$.

Поэтому для уменьшения объема кодового представления массива цветовых координат требуется из двух длин расстояний выбрать минимальную $R^{(\nu)}$:

$$R^{(\nu)} = \min \{ R(\min)^{(\nu)}, \ R(\max)^{(\nu)} \} \, . \qquad (18)$$

В этом случае для правильного восстановления изображения требуется знать информацию, относительно какой границы (верхней или нижней) вычислялась длина расстояния в разностном полиадическом пространстве. Следовательно, необходимо использовать дополнительный разряд. Если $R^{(\nu)} = R(\min)^{(\nu)}$, то значение дополнительного разряда будет равно 0. В противном случае значение разряда равно 1.

Значение дополнительного увеличения степени сжатия за счет адаптивного выбора начального уровня отсчета длины расстояний в разностном полиадическом пространстве равно

$$k_d = \frac{\ell og_2 \, R(\min)^{(\nu)}}{\ell og_2 \, R^{(\nu)}} , \qquad (19)$$

где $\ell og_2 \, R(\min)^{(\nu)}$, $\ell og_2 \, R^{(\nu)}$ – количество разрядов, отводимое на представление соответственно кода длины расстояний $R(\min)^{(\nu)}$ и $R^{(\nu)}$.

Значит, в результате перехода от абсолютного к разностному полиадическому представлению массивов цветовых координат и за счет адаптивного выбора начального уровня отсчета длины расстояний обеспечивается дополнительное устранения комбинаторной избыточности.

## 4. Разработка разностного полиадического кодирования массивов цветовых координат

Для дополнительного снижения времени на обработку относительно постолбцового комбинированного полиадического кодирования; для избежания потерь информации из-за переполнения машинного слова и для снижения требований на выбор максимальной длины серии предлагается осуществлять рекуррентный отбор элементов массивов цветовых координат для разностного полиадического кодирования. В этом случае проводится поэлементная проверка элементов $\Delta c_{ij}^{(\min)}$, $\Delta c_{ij}^{(\max)}$ на возможность добавления их к текущему разностному полиадическому числу. Правило отбора заключается в проверке признака переполнения машинного слова. Если переполнения машинного слова не произошло, то элемент обрабатываемого массива добавляется к текущему разностному полиадическому числу. В противном случае элемент массива цветовых координат считается первым элементом очередного разностного полиадического числа. Значение кода длины расстояния, вычисляется по мере добавления очередного элемента к текущему разностному полиадическому числу.

Процесс рекуррентного разностного полиадического кодирования массивов цветовых координат с учетом адаптивного выбора начального уровня отсчета длины расстояний состоит из следующих этапов:

*Этап 1.* Проверяется неравенство

$$S_1^{(j)} = s_{1j} \le 2^M .$$

Если неравенство выполняется, то организуется переход на следующий шаг. Если неравенство не выполняется, то перед разностным полиадическим кодированием требуется снизить диапазон цветовых координат.

*Этап 2.* Осуществляется проверка неравенства

$$S_2^{(j)} = \prod_{i=1}^{2} s_{ij} \le 2^M .$$

По результату проверки этого неравенства проводятся действия, аналогичные этапу 1. Если неравенство не выполняется, то разностное полиадическое число состоит из одной длины расстояния в разностном полиадическом пространстве:

$$R_j^{(1)} = \min\left(R_{(1,j)}^{(\min)},\ R_{(1,j)}^{(\max)}\right);$$

$$R_{(1,j)}^{(\min)} = \Delta c_{1j}^{(\min)};\quad R_{(1,j)}^{(\max)} = \Delta c_{1j}^{(\max)}.$$

Если результат сравнения положителен, то процесс формирования $j$-го кода длины продолжается.

*Этап 3.* Если неравенство $S_3^{(j)} = \prod_{i=1}^{3} s_{ij} \le 2^M$ не выполняется, то код длины расстояния в разностном полиадическом пространстве равен:

$$R_j^{(2)} = \min\left(R_{(2,j)}^{(\min)},\ R_{(2,j)}^{(\max)}\right);$$

$$R_{(2,j)}^{(\min)} = R_{(1,j)}^{(\min)} \times s_2 + \Delta c_2^{(\min)} ;$$

$$R_{(2,j)}^{(\max)} = R_{(1,j)}^{(\max)} \times s_2 + \Delta c_2^{(\max)} .$$

В противном случае проводится переход на следующий этап.

. . . .

*Этап m.* На этом этапе проверяемое неравенство выглядят следующим образом:

$$S_{m-1}^{(j)} = \prod_{i=1}^{m-1} s_{ij} \le 2^M .$$

В случае отрицательного результата код длины расстояний вычисляется по формуле

$$R_j^{(m-2)} = \min\left(R_{(m-2,j)}^{(\min)},\ R_{(m-2,j)}^{(\max)}\right).$$

*Этап m* + 1. По аналогии с предыдущими этапами на завершающем этапе выполняются действия:

1) проверяется неравенство

$$S_m^{(j)} = \prod_{i=1}^{m} s_{ij} \le 2^M \quad . \qquad (20)$$

2) если $S_m^{(j)} \le 2^M$ , то код длины расстояния $j$-го разностного полиадического числа равен

$$R_{(j)}^{(m)} = \begin{cases} R_{(m-1,j)}^{(\max)} \times s_{mj} + \Delta c_m^{(\max)}, \\ если \quad R_{(m,j)}^{(\min)} \ge R_{(m,j)}^{(\max)}; \\ R_{(m-1,j)}^{(\min)} \times s_{mj} + \Delta c_m^{(\min)}, \\ \quad если \quad R_{(m,j)}^{(\min)} < R_{(m,j)}^{(\max)}. \end{cases} \qquad (21)$$

3) если $S_m^{(j)} > 2^M$ , то разностное полиадическое число состоит из $(m-1)$-го элемента массива цветовых координат

$$R_{(j)}^{(m-1)} = \begin{cases} R_{(m-2,j)}^{(\max)} \times s_{m-1,j} + \Delta c_{m-1}^{(\max)}, \\ если \quad R_{(m-1,j)}^{(\min)} \ge R_{(m-1,j)}^{(\max)}; \\ R_{(m-2,j)}^{(\min)} \times s_{m-1,j} + \Delta c_{m-1}^{(\min)}, \\ \quad если \quad R_{(m-1,j)}^{(\min)} < R_{(m-1,j)}^{(\max)}. \end{cases} \qquad (22)$$

Таким образом, выражения (20) – (22) позволяют на основе рекуррентной схемы вычислить код длины расстояния $j$-го разностного полиадического числа.

## 5. Оценка эффективности

Оценка эффективности разработанного разностного полиадического кодирования массивов цветовых координат относительно комбинированного полиадического кодирования показывает, что:

– минимальная дополнительная степень сжатия равна 1,7 раз;

– снижение времени на обработку в среднем равно 20%.

## Заключение

Таким образом, можно сделать выводы:

1. Разработано разностное полиадическое кодирование массивов цветовых координат с учетом адаптивного выбора начального уровня отсчета длины расстояний. Доказано, что разработанное кодирование обеспечивает дополнительное исключение комбинаторной избыточности, вызванной уменьшением количества разрешенных комбинаций.

2. Разностное кодирование обеспечивает относительно комбинированного кодирования дополнительное увеличение степени сжатия минимум в 1,7 раз и снижение времени на обработку в среднем на 20%.

## Литература

1. Ватолин В.И., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. – М.: ДИАЛОГ – МИФИ, 2002. – 384 с.

2. Бондарев В.Н, Трестер Г., Чернега В.С. Цифровая обработка сигналов: методы и средства. – Севастополь: СевГТУ, 1999. – 398 с.

3. Баранник В.В., Корольова Н.А., Поляков П.Ф. Метод комбинированного полиадического кодирования массивов длин серий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2001. – № 5. – С. 42 – 46.

4. Королев А.В., Баранник В.В., Гиневский А.М. Метод компактного представления цветовых координат и длин серий // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вип.1(17). – С. 3 – 12.

*Поступила в редакцию 17.12.2004*

**Рецензент**: д-р техн. наук, проф. О.Н. Фоменко, Харьковский университет Воздушных Сил, Харьков.